塔里木河流域水-耕地-粮棉系统耦合关系及影响因素分析

卢　泉[1,2]，　高花彦[2]，　王鹏鹏[2]，　冯啸林[3]，　杨艳霞[2]

（1. 华中农业大学经济管理学院，湖北 武汉　430077；2. 塔里木大学经济与管理学院，新疆 阿拉尔　843300；
3. 新疆科技学院经济学院，新疆 库尔勒　841000）

摘　要： 作为典型的干旱区和生态脆弱区，塔里木河流域是我国粮食、棉花的重要生产基地。水资源、耕地资源与粮棉资源的良性协调发展成为流域可持续发展的关键。通过构建塔里木河流域水-耕地-粮棉系统，测算其发展指数，并以耦合协调度模型测量了系统的耦合程度，在此基础上利用Fractional Logit模型分析了水-耕地-粮棉系统协调发展的影响因素。结果表明：(1) 塔里木河流域各系统的发展指数呈现水系统>水-耕地-粮棉系统>耕地系统>粮棉系统。五地州中，巴音郭楞蒙古自治州各系统发展指数排名与流域一致，喀什地区和阿克苏地区在耕地和粮棉系统发展水平领先，水资源系统发展水平靠后，而克孜勒苏柯尔克孜自治州与和田地区则是水系统发展指数位居前列，耕地和粮棉系统发展较落后。(2) 流域内水-耕地-粮棉系统耦合协调度介于0.475~0.680之间，处于勉强协调与初级协调之间。五地州中，喀什地区最高，克孜勒苏柯尔克孜自治州最低。这一指标经过缓慢提升后在2017年后明显下降。五地州中，阿克苏地区下降最为明显。(3) 水库数量、一般公共预算支出及人口数量是影响水-耕地-粮棉系统协调发展状况的关键因素，三者每增加1个单位将分别引起耦合协调度1.0%、21.0%、35.6%的提升。

关 键 词： 水-耕地-粮棉；发展指数；耦合关系；影响因素分析

文章编号： 1000－6060(2024)05－0820－10(0820～0829)

农业绿色发展的本质是基于综合思维视角下协调农业生产各要素资源的利用方式，提升生产效率，统筹农业生产、人民生活与生态保护之间的关系，以促进区域可持续发展[1]。水资源与耕地资源作为农业生产的核心资源与生态环境的重要组成部分[2-3]，二者的协调发展能有效促进农业绿色发展的连续性与稳定性。同时，粮食安全已不仅仅关系到国计民生、社会稳定，更关系到国家安全、经济发展与全球粮食竞争[4-5]，是任何时候都值得热议的焦点问题[6-12]。因而，以粮食安全为核心的多系统研究成为农业绿色、可持续发展领域的关键问题，这种多系统表现为：水-能源-粮食系统、水-耕地-粮食系统、人口-耕地-粮食系统等。就研究方法而言，起初侧重于系统关联关系、耦合关系之类的定性分析，后期则着重于定量研究，研究方法包括耦合协调度模型、空间计量模型、系统仿真模型等模型。基于以往研究可知，水系统、耕地系统与粮食系统存在相互作用、相互制约、相互影响的复杂关系，但少有人将棉花资源纳入系统进行考量，棉花作为重要战略资源，在农业生产中占据重要地位[13]。

塔里木河流域是我国重要的粮棉生产基地，也是我国极具代表性的干旱区和生态环境脆弱区。水资源是制约流域经济发展、社会稳定与生态健康的基础性、战略性及决定性因素[14-16]。由于水资源的过度开发和利用效率低下，流域水资源紧缺和水生态脆弱等问题日益严重[17-31]，严重影响流域水安

收稿日期： 2023-09-11；　**修订日期：** 2023-11-21
基金项目： 国家社会科学基金一般项目(19BJY139)；首批国家级新文科研究与实践项目(2021090093)资助
作者简介： 卢泉(1978-)，男，教授，主要从事水资源保护、农业节水补偿等方面的研究. E-mail: luquan0122@163.com
通讯作者： 杨艳霞(1999-)，女，硕士研究生，主要从事水资源保护、农业节水补偿等方面的研究. E-mail: 17809971661@163.com

全及生态安全[32]。同时，作为绿洲农业区，耕地资源对塔里木河流域的经济发展与生态保护具有重要的支撑作用[33-34]。当前，流域耕地面积不断扩大[35-38]，不合理的土地开发利用加大了流域的生态风险[39]。伴随着人口的不断增加，粮棉资源的需求量和消费量随之上升，粮棉资源不确定性凸显。如何协调水-耕地-粮棉生产之间的关系，实现人与自然和谐共生是一个亟待解决的重大理论和实践问题。

由于各资源间存在着千丝万缕的联系与复杂的循环关系，单一地将资源割裂开的研究已不能满足当前发展的需要，亟需统筹考虑水-耕地-粮棉之间相互依存、彼此影响的关系。基于既往研究成果结合研究区域特点，本文构建了塔里木河流域水-耕地-粮棉系统，通过测算其发展指数，探究各系统的发展变化情况，然后利用耦合协调度模型衡量水-耕地-粮棉系统的耦合水平，探究三者之间的协调发展水平变化情况，最后通过计量分析研究影响水-耕地-粮棉系统耦合关系的因素。本研究是对农业绿色发展和粮食安全理论的重要补充，对于贯彻中央农村工作会议精神和新疆维吾尔自治区党委十届十中全会精神，坚决扛起保障国家粮食和棉花安全的政治责任，加强耕地保护和建设，推动粮食增产丰收，加快形成我国农作物生产能力的战略后备，协调塔里木河流域农业生产和生态保护，促进人与自然和谐共生意义重大。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

塔里木河流域位于新疆南部盆地，流域覆盖巴音郭楞蒙古自治州（巴州）、阿克苏地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州（克州）、喀什地区及和田地区，由高山区冰雪融水、中山带森林降水及低山带基岩裂隙水形成[19]。流域面积1.03×10^6 km^2，年平均径流量约4.10×10^{10} m^3，水资源总量季节差异明显，地区分布不均。2020年，流域共有耕地4.22×10^6 hm^2，其中种植粮棉面积2.04×10^6 hm^2，总产量7.42×10^6 t。

1.2　数据来源、指标体系构建及权重处理

1.2.1　*数据来源*　数据来源于2006—2021年《新疆统计年鉴》《新疆国民经济和社会发展统计公报》。

1.2.2　*系统发展指数指标选择*　不同系统的发展状况与耦合协调程度是当前农业绿色发展关注的重点，当前关于水、耕地、粮食、能源等系统的评价指标已非常成熟，棉花作为塔里木河流域的主要农业作物，将其纳入粮食系统，选取相同的指标形成“粮棉系统”，探究三大系统间的内在联系。本文以2005—2020年塔里木河流域5个地州为研究对象，参考我国关于水-耕地-粮食关联研究、以粮食安全为核心的多系统相关研究为基础，并结合本流域实际情况，选取14个指标构建水-耕地-粮棉系统[10,12]，指标权重利用熵值法处理（表1）。

表1　塔里木河流域水-耕地-粮棉系统指标体系及权重

Tab. 1　Index system and weights of water-cropland-grain-cotton system in the Tarim River Basin

系统名称	指标名称	指标性质	信息熵值	权重系数/%
水	水资源总量/10^8 m^3	正	0.9425	9.48
	供水总量/10^8 m^3	正	0.9358	10.58
	第一产业用水量/10^8 m^3	负	0.9461	8.89
	第二产业用水量/10^8 m^3	负	0.9873	2.09
	居民生活用水量/10^8 m^3	负	0.9923	1.27
	人均用水量/m^3·人$^{-1}$	负	0.9672	5.42
	产水模数/10^4 m^3·km^{-2}	正	0.9413	9.68
	亿元GDP用水量/10^8 m^3·(10^8元)$^{-1}$	负	0.9845	2.56
耕地	农作物播种面积/hm^2	正	0.9226	12.78
	农业机械总动力/kW	正	0.9242	12.51
	化肥使用量/t	负	0.9722	4.59
粮棉	粮棉总产量/t	正	0.9244	12.47
	粮棉单位面积产量/t·hm^{-2}	正	0.9676	5.35
	粮棉播种面积比重/%	正	0.9859	2.33

1.2.3　*影响因素指标选择*　本文结合塔里木河流域实际，参考向雁、汪中华等学者的相关研究[10,12]，以系统耦合协调度作为被解释变量，将水库数量、年平均气温、一般公共预算支出、人口数量与地区生产总值5个变量作为解释变量。具体如下：

（1）水库数量（X_1）：水库对调节局部气候、涵养水源、改善水资源储量季节差异、灌溉农作物以及保障粮棉生产安全具有重要意义。

（2）年平均气温（X_2）：当前，塔里木河流域呈现出气候暖湿化特征，加剧了固体水库冰川消融的速度，影响流域水资源供给及农业生产活动。

（3）一般公共预算支出（X_3）：一般公共预算支出常用于推动经济社会发展、保护环境等方面。水资源、耕地资源与粮棉资源既是生态环境的重要组

成部分,又是社会经济发展的基础环节。

(4) 人口数量(X_4):人口数量的持续上升必然会带来水资源、耕地资源与粮棉资源的需求量出现不同程度的上涨。

(5) 地区生产总值(X_5):用于考虑经济因素对于水-耕地-粮棉系统的影响。

1.3 评价方法

1.3.1 耦合协调度模型 耦合度指2个或2个以上系统间的相互作用影响,实现协调发展的动态关联关系,可以反映系统之间的相互依赖相互制约程度。因此,文章采用耦合协调度模型来衡量水、耕地、粮棉之间的耦合协调发展水平。本文使用丛晓男[40]修订的模型,模型构建如下:

$$C = 3 \times \left[\frac{f(x_t) \times g(y_t) \times h(z_t)}{[f(x_t) + g(y_t) + h(z_t)]^3} \right]^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

$$T = \alpha[f(x_t)] + \beta g(y_t) + \gamma h(z_t) \tag{2}$$

$$Y = \mathrm{Sqrt}(C \times T) \tag{3}$$

$$f(x) = \sum_{t=1}^{16} f(x_t) = \sum_{t=1}^{16} W_i X'_{it} \tag{4}$$

$$g(y) = \sum_{t=1}^{16} g(y_t) = \sum_{t=1}^{16} W_j Y'_{jt} \tag{5}$$

$$h(z) = \sum_{t=1}^{16} h(z_t) = \sum_{t=1}^{16} W_k Z'_{kt} \tag{6}$$

式中:C、T、Y分别为耦合度、水-耕地-粮棉系统发展指数、耦合协调度;α、β、γ为各个子系统对社会发展影响程度的权重,设定各个子系统对社会发展影响程度的权重相等,即$\alpha=\beta=\gamma=1/3$;$f(x)$、$g(y)$、$h(z)$分别为水、耕地、粮棉系统的发展指数;$f(x_t)$、$g(y_t)$、$h(z_t)$分别为水、耕地、粮棉系统的第t年的发展指数;i、j、k分别为水、耕地、粮棉系统;W_i、W_j、W_k分别为水、耕地、粮棉系统二级指标的权重;X'_{it}、Y'_{jt}、Z'_{kt}分别为第t年水系统、耕地系统与粮棉系统各个指标标准化后的数值。

参考汪中华等[12]对于耦合协调程度的划分,将耦合协调度划分为极度失调(0.0, 0.1)、严重失调[0.1, 0.2)、中度失调[0.2, 0.3)、轻度失调[0.3, 0.4)、濒临失调[0.4, 0.5)、勉强协调[0.5, 0.6)、初级协调[0.6, 0.7)、中级协调[0.7, 0.8)、良好协调[0.8, 0.9)、优质协调[0.9, 1.0)。

1.3.2 空间自相关检验 本文使用全局莫兰指数判断塔里木河流域水-耕地-粮棉系统耦合协调度是否存在空间相关性,然后再决定是否采用空间计量模型来验证其影响关系。全局莫兰指数的取值范围为(−1, 1),公式如下:

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} w_{ij}(Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{Y})^2} \tag{7}$$

式中:I为全局莫兰指数;N为空间单位数;Y为耦合协调度;$\bar{Y}$为耦合协调度均值;w_{ij}为空间权重;W为所有空间权重的总和。

1.3.3 分数回归模型 考虑到耦合协调度自身取值范围处于0~1之间的特殊性,且没有出现堆积,故选择以Fractional Logit为代表的分数回归模型[41]。模型设置如下:

$$Y/(1-Y) = \exp(a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 \ln X_3 + b_4 \ln X_4 + b_5 \ln X_5 + \varepsilon) \tag{8}$$

式中:Y为耦合协调度;a为常数项;b_1、b_2、b_3、b_4、b_5分别为各影响因素的系数;X_1、X_2、X_3、X_4、X_5分别为水库数量、年平均气温、一般公共预算支出、人口数量及地区生产总值,由于除水库数量、年平均气温以外其他变量的波动较大,为了减弱其异方差性,故对其他变量进行对数化处理以保证数据的平稳性;ε为随机扰动项。

2 结果与分析

2.1 塔里木河流域水-耕地-粮棉系统发展水平

2.1.1 塔里木河流域水-耕地-粮棉系统发展总体情况 2005—2020年,塔里木河流域各系统发展指数高低依次为:水系统>水-耕地-粮棉系统>耕地系统>粮棉系统(图1a)。水系统发展指数最高,但其发展指数波动明显。这体现出塔里木河流域是水资源主导下的农业经济社会系统。耕地系统发展指数稳步上升。粮棉系统发展指数在0.341~0.515之间徘徊,变动幅度较小但依然存在不稳定性。水-耕地-粮棉系统发展指数总体处于上升趋势,但局部波动明显。此外,2017年是塔里木河流域各系统发展指数的转折点,其中水、粮棉及水-耕地-粮棉系统由上升转为下降趋势,而耕地系统相反。这反映出耕地系统的快速发展是其他系统发展变化的重要驱动力。

2.1.2 不同地区水-耕地-粮棉系统发展演变 2005—2020年,塔里木河流域各地州系统发展呈现不同的态势(图1b~f)。巴州各系统发展指数高低依次为:

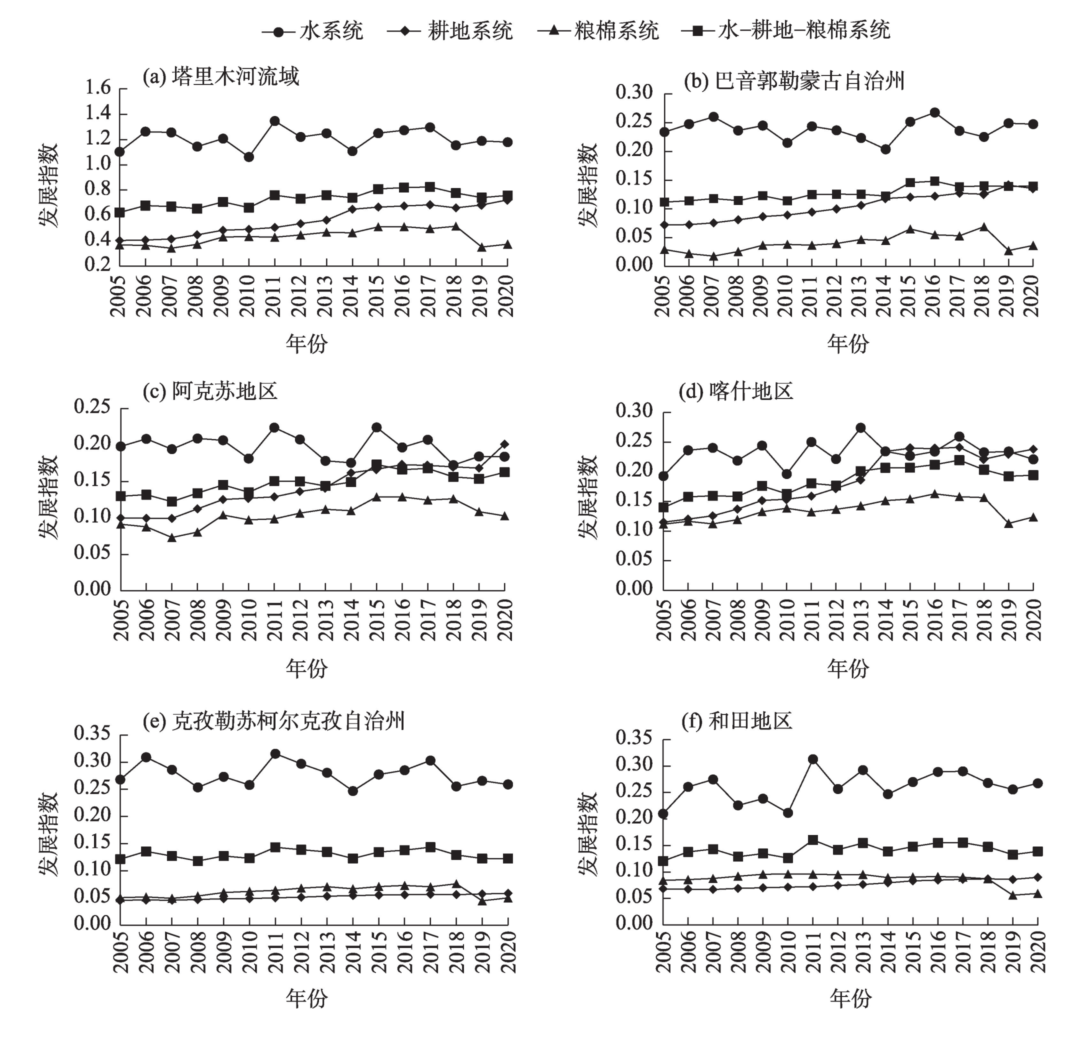


图1 2005—2020年塔里木河流域及5个地州各系统发展指数演变

Fig. 1 Evolution of development indices of each system in the Tarim River Basin and the five prefectures from 2005 to 2020

水系统>水-耕地-粮棉系统>耕地系统>粮棉系统，与塔里木河流域各系统发展指数排序趋于一致。但是，2019年耕地系统的发展指数超过水-耕地-粮棉系统的发展指数(图1b)。

阿克苏地区和喀什地区各系统发展变化情况类似。相较于整个流域来说，2地区的系统演化更为激烈。突出表现在：一是耕地系统发展指数增长更快；二是系统变化时间节点更早。以2013年为时间节点，2地区各系统的发展指数排名在2013年以前与流域各系统排名情况一致。但是，2013年以后，2地区的耕地系统发展指数快速增长，超越水-耕地-粮棉系统和水资源系统发展指数(图1c~d)。

克州与和田地区各系统发展变化情况相类似。与整个流域及其他地区不同的是，在2018年以前，2地区的粮棉系统发展指数一直高于耕地系统发展指数，且变化相对平缓。2018年以后，粮棉系统发展指数快速下降，耕地系统开始超越粮棉系统(图1e~f)。

2.1.3 各系统的地区发展差异分析 从各系统发展指数变化来看，喀什地区水系统发展指数在2011、2013、2017年3个时间节点超越巴州。耕地系统排名相当稳定，喀什地区和阿克苏地区的发展指数在5个地州一直领先。从粮棉系统发展指数来看，和田地区在2006—2008年间领先阿克苏地区。从水-耕地-粮棉系统发展指数来看，和田地区在2007、2011、2013年3次超过阿克苏地区，巴州在2014年开始超越克州(图2a~d)。各系统发展指数的变化反映了流域不同地州人类经济活动的变化。

2.2 塔里木河流域水-耕地-粮棉系统耦合协调度评价

2005—2020年塔里木河流域水-耕地-粮棉系统耦合协调度均值较低，处于濒临失调与初级协调

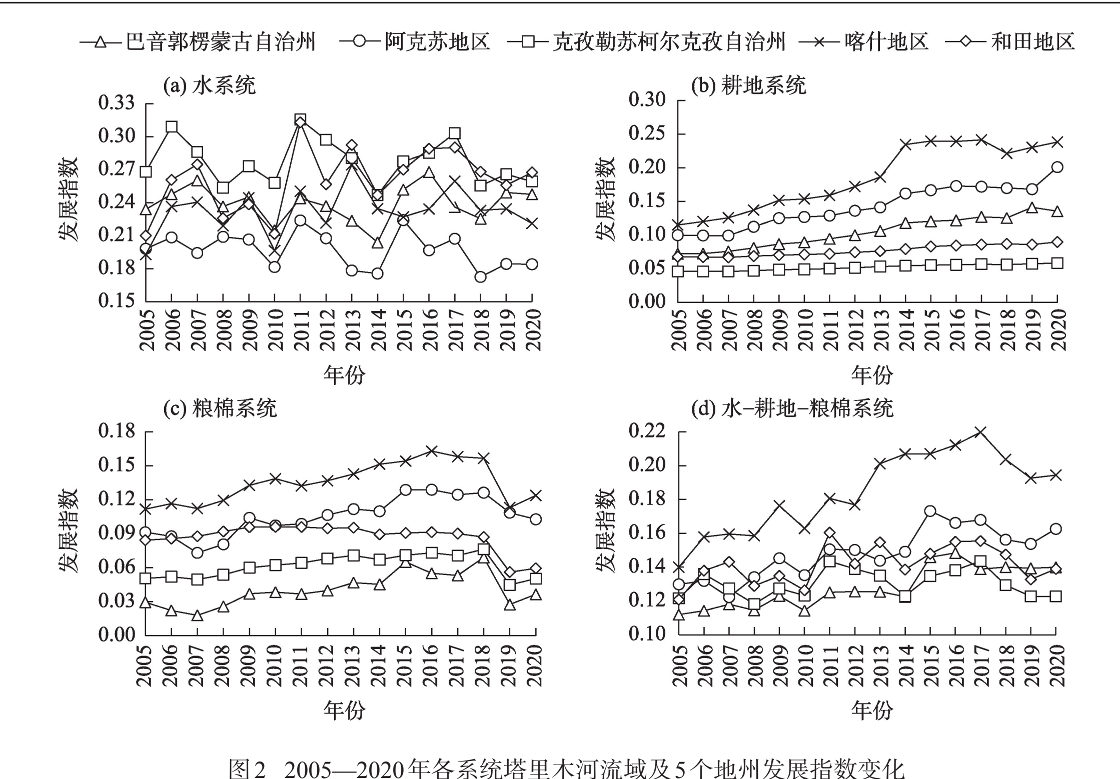


图2 2005—2020年各系统塔里木河流域及5个地州发展指数变化

Fig. 2 Changes of development indices of the Tarim River Basin and the five prefectures in each system from 2005 to 2020

表2 2005—2020年塔里木河流域水-耕地-粮棉系统耦合协调度均值

Tab. 2 Mean values of coupled coordination of water-cropland-grain-cotton systems in the Tarim River Basin from 2005 to 2020

年份	耦合协调程度	耦合协调度	年份	耦合协调程度	耦合协调度
2005	濒临失调	0.475	2013	初级协调	0.606
2006	勉强协调	0.515	2014	勉强协调	0.581
2007	濒临失调	0.492	2015	初级协调	0.673
2008	勉强协调	0.518	2016	初级协调	0.669
2009	勉强协调	0.574	2017	初级协调	0.680
2010	勉强协调	0.511	2018	勉强协调	0.599
2011	初级协调	0.615	2019	勉强协调	0.583
2012	初级协调	0.600	2020	初级协调	0.601

之间，14 a间有2 a（2005、2007年）濒临失调，余下12 a勉强协调和初级协调各占一半，反映了水-耕地-粮棉系统耦合协调水平不高（表2）。特别是自2011年系统达到初级协调后，在2014、2018、2019年这3个年份出现了勉强协调状态。协调是持续健康发展的内在要求，系统耦合协调程度低就意味着无法实现资源的有效配置和合理利用、生态环境得不到有效合理的开发保护，从而为流域经济发展、当地人口的生产生活以及生态环境保护带来极大的挑战。此外，系统的耦合协调程度存在不稳定性，农业生产是关乎国计民生的基础因素，因而需要稳定、健康、可持续的生产环境。耦合协调程度的强烈波动程度不利于农业生产的连续性与稳定性。可能的原因在于塔里木河流域综合治理工程（一期）结束后，耕地的报复性扩张耗费了大量的水资源。这意味着未来很长时间内，协调水-耕地-粮棉系统优质协调发展将成为塔里木河流域区域可持续发展的艰巨任务。

塔里木河流域各地州水-耕地-粮棉系统耦合协调度地州差异明显，体现出地州资源禀赋、资源利用效率的不同，在一定程度上反映出地州基本情况（图3）。2005—2020年喀什地区在5个地州中耦合协调程度最高。该地区水-耕地-粮棉系统耦合协调程度大致处于良好协调程度，中级协调程度以上占比高达75%，部分年份达到优质协调水平，这与发展指数分析结果一致。和田地区耦合协调度均值在5个地州中仅次于喀什地区，但也仅在勉强协调与初级协调之间徘徊，以勉强协调程度为主。阿克苏地区耦合协调度均值高于流域均值，但波动很大。该地区耦合协调度在2013—2014年和2018—2019年都低于流域均值，特别是在2018年，耦合协调度处于5个地州最低水平；2005—2020年

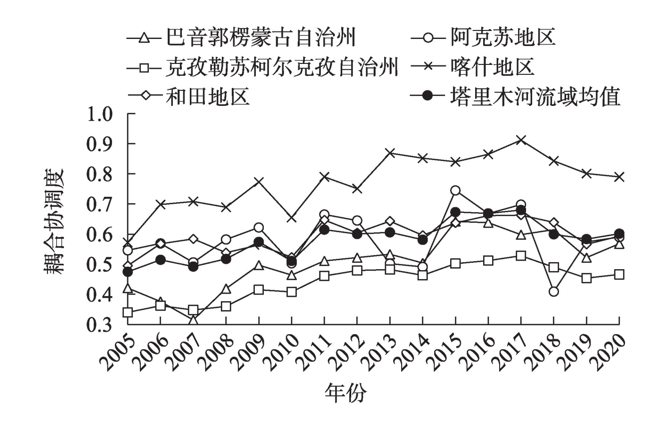


图3　2005—2020年塔里木河流域及5个地州的水-耕地-粮棉系统耦合协调度

Fig. 3　Coupled coordination of water-cropland-grain-cotton systems in the Tarim River Basin and the five prefectures from 2005 to 2020

勉强协调占比高达50%。巴州的耦合协调度较低，勉强协调占比达43.75%，整体耦合协调度均值低于流域均值。克州的耦合协调度最低，一直呈平稳上升趋势，到2017年后有所下降。由于塔里木河流域各地州水-耕地-粮棉系统发展水平不平衡造成地州间耦合协调度差异明显，不利于流域的可持续发展。

2.3　水-耕地-粮棉系统耦合协调度影响因素

2.3.1　空间自相关检验　2005—2020年塔里木河流域水-耕地-粮棉系统耦合协调度全局莫兰指数值均为负值，且对应的P值均大于0.05，说明全局莫兰指数统计值均未通过既定水平的显著性检验(表3)。可以拒绝塔里木河流域水-耕地-粮棉系统耦合协调度存在空间自相关的原假设，说明塔里木河流域各地区水-耕地-粮棉系统耦合协调度不存在空间集聚效应。

2.3.2　影响因素分析　设定显著性水平为0.05，Fractional Logit模型分析结果如表4所示。

X_1的回归系数值为0.010(P=0.028<0.05)，回归系数通过0.05的显著性水平检验，可以拒绝回归系数为零的原假设，表明水库数量对系统耦合协调度有正向推动作用。其经济意义表现为每增加1座水库，系统耦合协调度就提升1.0%。其原因在于水库能够对耕地进行有效灌溉，从而保障农业生产的连续性与稳定性。其次，水库可有效调节水资源的季节差异与地区差异，促进水资源的可持续开发利用。

X_2的回归系数值为−0.036(P=0.542>0.05)，回归系数未通过0.05显著性水平检验，无法拒绝回归系数为零的原假设，表明年平均气温不是系统耦合协调度的主要影响因素。

lnX_3的回归系数值为0.210(P=0.001<0.05)，回归系数通过0.01的显著性水平检验，可以拒绝回归系数为零的原假设，表明一般公共预算支出能够促进系统耦合协调度的提升。其经济意义表示为每增加1×10^4元的公共预算支出，就会提升21.0%的耦合协调度。一般公共预算支出的增加，意味着农业农村、水利设施和环境保护等方面有更加充足的资金保障，有利于系统耦合协调度的提升。

lnX_4的回归系数值为0.356(P<0.001)，回归系数通过0.01的显著性水平检验，可以拒绝回归系数为零的原假设。意味着人口数量对系统耦合协调度的提升起到了促进作用，可见流域内人力资本提升产生的耕地开发和粮棉生产的边际增长率较大。其经济意义为每增加1×10^4人，系统的耦合协调度就会提升35.6%。

lnX_5的回归系数值为−0.047(P=0.412>0.05)，回归系数未通过0.05显著性水平检验，无法拒绝回归系数为零的原假设，表明地区生产总值不是水-耕地-粮棉系统的耦合协调度的主要影响因素。

表3　2005—2020年塔里木河流域耦合协调度全局莫兰指数

Tab. 3　Global Moran's *I* index of coupling coordination in the Tarim River Basin from 2005 to 2020

年份	全局莫兰指数	标准偏差	P值	年份	全局莫兰指数	标准偏差	P值
2005	−0.437	0.216	0.194	2013	−0.2523	0.170	0.494
2006	−0.333	0.228	0.357	2014	−0.263	0.150	0.464
2007	−0.253	0.226	0.495	2015	−0.500	0.202	0.108
2008	−0.395	0.220	0.255	2016	−0.412	0.166	0.164
2009	−0.414	0.196	0.202	2017	−0.377	0.172	0.231
2010	−0.340	0.175	0.303	2018	−0.305	0.197	0.390
2011	−0.366	0.218	0.298	2019	−0.364	0.152	0.226
2012	−0.390	0.210	0.253	2020	−0.396	0.159	0.180

表4 Fractional Logit模型参数估计结果

Tab. 4 Fractional Logit model parameter estimation results

变量	回归系数	标准误	Z值	P值	置信区间	
X_1	0.010	0.005	2.20	0.028	0.001	0.019
X_2	−0.036	0.059	−0.61	0.542	−0.150	0.079
$\ln X_3$	0.210	0.064	3.30	0.001	0.085	0.335
$\ln X_4$	0.356	0.102	3.50	0.000	0.156	0.555
$\ln X_5$	−0.047	0.057	−0.82	0.412	−0.160	0.065
常数	−2.075	1.034	−2.01	0.045	−4.102	−0.049

表5 OLS模型与Tobit模型参数估计结果

Tab. 5 Parameter estimation results of OLS and Tobit models

变量	OLS模型			Tobit模型		
	回归系数	标准误	P值	回归系数	标准误	P值
X_1	0.002^{**}	0.001	0.043	0.002^{**}	0.001	0.023
X_2	−0.007	0.013	0.584	−0.007	0.011	0.514
$\ln X_3$	0.048^{***}	0.015	0.002	0.048^{***}	0.014	0.001
$\ln X_4$	0.088^{***}	0.025	0.000	0.088^{***}	0.025	0.001
$\ln X_5$	−0.011	0.015	0.441	−0.011	0.015	0.451
常数	−0.013	0.239	0.958	−0.013	0.214	0.953

注:**、***分别表示在0.05、0.01水平上显著。

2.3.3 稳健性检验 考虑到被解释变量取值的特殊性及Fractional Logit模型的适用性,可能会使回归结果出现偏误。为验证指标解释能力的强壮性,需进行稳健性检验。同时由于被解释变量是通过耦合协调度公式结算获取,很难找到合适的替换变量。故本文采取更换回归模型的方式,选取OLS模型与Tobit模型进行稳健性检验。由表5可知,在OLS回归模型与Tobit回归模型下,各影响因素参数的取值方向与显著性与Fractional Logit回归模型一致。因此,认为Fractional Logit模型的参数估计结果具有稳健性。

3 结论与建议

3.1 结论

(1) 2005—2020年塔里木河流域各系统综合发展水平存在差异。发展指数高低依次为:水系统>水-耕地-粮棉系统>耕地系统>粮棉系统。水-耕地-粮棉系统发展指数总体处于上升趋势,但局部波动明显,呈波浪式前进。

(2) 塔里木河流域水-耕地-粮棉系统发展指数存在明显的地州差异。水-耕地-粮棉系统发展指数,排名依次为喀什地区>阿克苏地区>和田地区>克州>巴州;喀什地区和阿克苏地区在耕地和粮棉系统发展水平领先,水资源系统发展水平靠后,而克州与和田地区则是水系统发展指数位居前列,耕地和粮棉系统发展较落后。

(3) 塔里木河流域水-耕地-粮棉系统耦合协调度处于勉强协调与初级协调之间,属于低层次的协调。塔里木河流域治理工程的基本完成使得2011—2017年塔里木河流域4个地州(阿克苏地区除外)耦合协调度上升,但所有地州的耦合协调度在2018年以后都出现了不同幅度的下降。系统的耦合协调度存在地区差异,喀什地区、和田地区、阿克苏地区系统的耦合协调度高于流域平均水平,喀什地区优于其他地州,阿克苏地区耦合协调度波动最为明显。

(4) 水库数量、一般公共预算支出与人口数量对塔里木河流域水-耕地-粮棉系统的协调发展有显著的推动作用。

3.2 建议

塔里木河流域是以水资源为主导的农业社会经济体系,要统筹做好节水蓄水调水增水工作,为高质量发展提供水安全、水支撑、水保障,要鼓励农业节水技术的研发,提高农业用水效率;要支持粮棉种植生产的变革,提高单位产量,保障稳定生产,支持引进耐旱作物,优化种植结构和产业布局;限制耕地的盲目开垦,做到"以水定地";加大公共预算支出,加大耕地保护和水库建设投资,并加强人口特别是高素质人口聚集给予粮棉生产强有力的支持;各地区应当将本地的资源优势与实际情况紧密结合起来,制定有针对性的策略,对高耗水、高耗地的种植方式加以限制和引导,推动其优化升级。不断推动塔里木河流域农业生产资源节约、环境友好、生态保育的绿色发展之路。

参考文献(References)

[1] Mingaleva Z, Shaidurova N, Prajová V. The role of technoparks in technological upgrading of the economy: The example of agricultural production[J]. Management Systems in Production Engineering, 2018, 26(4): 241-245.

[2] 王婷, 王芝潇, 毛德华. 中国主要粮食作物虚拟水-虚拟耕地资源时空匹配格局[J]. 世界农业, 2019(10): 71-79, 110. [Wang Ting, Wang Zhixiao, Mao Dehua. Spatial and temporal match pat-

tern of virtual water versus virtual cultivated land of main grain crops in China[J]. World Agriculture, 2019(10): 71-79, 110.]

[3] 王婷, 毛德华. 中国主要粮食作物虚拟水-虚拟耕地复合系统利用评价及耦合协调分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 40-49, 56. [Wang Ting, Mao Dehua. Evaluation and coupling coordination analysis of virtual water-virtual cultivated land system of main grain crops in China[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(4): 40-49, 56.]

[4] 邓军, 马泉来, 卫华鹏, 等. 粮食安全视角下河南省淮河流域耕地资源时空演变[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 390-396. [Deng Jun, Ma Quanlai, Wei Huapeng, et al. Spatial-temporal evolution of cultivated land resources in Huai River Basin of Henan Province from the perspective of food security[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 390-396.]

[5] 张小允, 鲍洁, 许世卫. 基于熵权TOPSIS模型的中国粮食安全评价研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(4): 35-44. [Zhang Xiaoyun, Bao Jie, Xu Shiwei. Research on the evaluation of China's food security based on entropy weight TOPSIS model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(4): 35-44.]

[6] Zhang C, Chen X X, LI Y, et al. Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195(10): 625-639.

[7] White D J, Hubacke K, Feng K S, et al. The water-energy-food nexus in East Asia: A tele-connected value chain analysis using inter-regional input-output analysis[J]. Applied Energy, 2018, 210: 550-567.

[8] Simpson G B, Jewitt G P W. The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: A review[J]. Frontiers in Environmental Science, 2019, 7: 00008, doi: 10.3389/fenvs.2019.00008.

[9] Niva V L, Cai J L, Taka M J, et al. China's sustainable water-energy-food nexus by 2030: Impacts of urbanization on sectoral water demand[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 25l(1): e119755, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119755.

[10] 向雁. 东北地区水-耕地-粮食关联研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [Xiang Yan. Study on water-land-food (WLF) nexus in northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.]

[11] 李成宇, 张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 120-128. [Li Chengyu, Zhang Shiqiang. Coupling coordination degree of water-energy-grain and its influencing factors in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(1): 120-128.]

[12] 汪中华, 田宇薇. 我国水-能源-粮食耦合关系及影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2022, 20(2): 243-252. [Wang Zhonghua, Tian Yuwei. Coupling relationship between water, energy and grain and its influencing factors in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2): 243-252.]

[13] Lu Q, Yang Y, Li B, et al. Coupling relationship and influencing factors of the water-energy-cotton system in Tarim River Basin[J]. Agronomy, 2022, 12(10): 2333, doi: 10.3390/agronomy12102333.

[14] Guo H W, Xu H L, Ling H B. Study of ecological water transfer mode and ecological compensation scheme of the Tarim River Basin in dry years[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(10): 1705-1717.

[15] Zhao S J. Evaluation of ecological environmental carrying capacity of the Tarim River Basin[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2018, 24(1): 1-7.

[16] Zuo Q T, Wu B B, Zhang W, et al. A method of water distribution in transboundary rivers and the new calculation scheme of the Yellow River water distribution[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 37-45.

[17] 李玉芳, 刘海隆, 刘洪光. 塔里木河流域水资源脆弱性评价[J]. 中国农村水利水电, 2014(4): 90-93. [Li Yufang, Liu Hailong, Liu Hongguang. Water resources fragility assessment of the Tarim River valley[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(4): 90-93.]

[18] 王光焰, 王远见, 桂东伟. 塔里木河流域水资源研究进展[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1151-1159. [Wang Guangyan, Wang Yuanjian, Gui Dongwei. Research progress of water resources in Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1151-1159.]

[19] Huang D C, Ren Y P, Zhang C Z. Effect of utilization efficiency of water resources on human-water harmony under intensity-total control[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(2): 1-7.

[20] 陈亚宁, 郝兴明, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河流域水系连通与生态保护对策研究[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(10): 1156-1164. [Chen Yaning, Hao Xingming, Chen Yapeng, et al. Study on water system connectivity and ecological protection countermeasures of Tarim River Basin in Xinjiang[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(10): 1156-1164.]

[21] 陈磊, 梁新平. 基于改进综合赋权法的塔里木河流域"三源一干"水资源承载力评价[J]. 节水灌溉, 2019(1): 72-75, 83. [Chen Lei, Liang Xinping. Evaluation of water resources carrying capacity of "three sources and one trunk" in Tarim River Basin based on improved comprehensive weighting method[J]. Water Saving Irrigation, 2019(1): 72-75, 83.]

[22] 艾克热木·阿布拉, 王月健, 凌红波, 等. 塔里木河流域水资源变化趋势及用水效率分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2019, 37(1): 112-120. [Abula Aikeremu, Wang Yuejian, Ling Hongbo, et al. Water resources change trend and water use efficiency analysis in Tarim River Basin[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2019, 37(1): 112-120.]

[23] Kelimu, Jiang F R. Present situation of water resources endowment, development and utilization and long-term strategic counter-

measures in Xinjiang[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(12): 57-64.

[24] Zuo Q T, Zhang Z Z, Wu B B. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7.

[25] 李星, 左其亭, 韩淑颖, 等. 塔里木河流域水资源适应性利用能力评价及调控[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 63-68. [Li Xing, Zuo Qiting, Han Shuying, et al. Evaluation and regulation of water resources adaptive utilization capacity in Tarim River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 63-68.]

[26] 魏光辉. 新疆塔里木河流域水资源与生态安全的几点思考[J]. 中国水利, 2021(5): 28-30. [Wei Guanghui. Considerations on water resources and ecological security in the Tarim River Basin of Xinjiang[J]. China Water Resources, 2021(5): 28-30.]

[27] 刘夏, 张曼, 徐建华, 等. 基于系统动力学模型的塔里木河流域水资源承载力研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1407-1416. [Liu Xia, Zhang Man, Xu Jianhua, et al. Study on water resources carrying capacity of Tarim River Basin based on system dynamics model[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1407-1416.]

[28] 李原园, 李云玲, 何君. 新发展阶段中国水资源安全保障战略对策[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1340-1346, 1354. [Li Yuanyuan, Li Yunling, He Jun. Strategic countermeasures of China's water resources security in the new development stage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1340-1346, 1354.]

[29] 刘雨曈. 塔里木河流域水土流失动态变化分析[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(3): 105-112. [Liu Yutong. Soil alteration and water loss in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(3): 105-112.]

[30] Lu Q, Liu F J, Li Y J, et al. Study on the relationship between water resources utilization and economic growth in Tarim River Basin from the perspective of water footprint[J]. Water, 2022, 14(10): 1655, doi: 10.3390/W14101655.

[31] 孙克, 张信为, 聂坚, 等. 中国省域水资源利用绩效评价及空间分异和驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 102-110, 186. [Sun Ke, Zhang Xinwei, Nie Jian, et al. Evaluation of provincial water resources utilization performance in China and its spatial differentiation and driving factor analysis[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 102-110, 186.]

[32] 粟晓玲, 刘雨翰, 姜田亮, 等. 西北地区陆地生态系统未来生态需水量预估[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 9-18, 78. [Su Xiaoling, Liu Yuhan, Jiang Tianliang, et al. Prediction of future ecological water demand of terrestrial ecosystem in northwest China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 9-18, 78.]

[33] 祁泓锟, 焦菊英, 严晰芹, 等. 近40年塔里木河流域水沙演变及其空间分异特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 117-123. [Qi Hongkun, Jiao Juying, Yan Xiqin, et al. Runoff and sediment evolution and its spatial differentiation in the Tarim River Basin in recent 40 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 117-123.]

[34] 吴青松, 马军霞, 左其亭, 等. 塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 55-62. [Wu Qingsong, Ma Junxia, Zuo Qiting, et al. Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 55-62.]

[35] 周瑞涛, 郑航, 刘悦忆. 塔里木河流域的绿洲迁移研究[J]. 水利水电技术, 2021, 52(2): 155-164. [Zhou Ruitao, Zheng Hang, Liu Yueyi. Understading the evolution of the Tarim River oasis[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(2): 155-164.]

[36] Li B, Wang R, Lu Q. Land tenure and cotton farmers' land improvement: Evidence from state-owned farms in Xinjiang, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19: 117, doi: 10.3390/ijerph19010117.

[37] 王希义, 徐海量, 潘存德. 塔里木河流域耕地面积动态变化特征及驱动因子[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 327-332. [Wang Xiyi, Xu Hailiang, Pan Cunde. Change features of cultivated land resources and its driving factors in Tarim River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 327-332.]

[38] 焦伟, 刘新平, 张琳, 等. 塔里木河流域土地开发的生态响应研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1396-1404. [Jiao Wei, Liu Xinping, Zhang Lin, et al. Ecological response to the land development in Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1396-1404.]

[39] 高玥, 刘新平. 干旱区内陆河流域土地利用结构时空变化分析——以塔里木河流域为例[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(7): 62-66. [Gao Yue, Liu Xinping. Spatial and temporal variation of land use structure in inland river basin of arid area: Take the Tarim River Basin as an example[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(7): 62-66.]

[40] 丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用[J]. 经济地理, 2019, 39(4): 18-25. [Cong Xiaonan. Expression and mathematical property of coupling model, and its misuse in geographical science[J]. Economic Geography, 2019, 39(4): 18-25.]

[41] 苏振东, 洪玉娟, 刘璐瑶. 政府生产性补贴是否促进了中国企业出口?——基于制造业企业面板数据的微观计量分析[J]. 管理世界, 2012(5): 24-42. [Su Zhendong, Hong Yujuan, Liu Luyao. Have the production-related subsidies of the government promoted the export of China's firms?[J]. Journal of Management World, 2012(5): 24-42.]

Coupling relationship and influencing factors of water-cropland-grain-cotton system in Tarim River Basin

LU Quan[1,2], GAO Huayan[2], WANG Pengpeng[2], FENG Xiaolin[3], YANG Yanxia[2]

(1. College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430077, Hubei, China; 2. College of Economics and Management, Tarim University, Aral 843300, Xinjiang, China; 3. College of Economics, Xinjiang Institute of Science and Technology, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: In the arid and ecologically sensitive Tarim River Basin, a vital hub for grain and cotton production in China, the harmonious development of water, arable land, and agricultural resources is crucial for sustainable growth. This study constructs a water-cropland-grain-cotton system model for the basin, evaluates its development index, and assesses the system's coupling coordination using a coupling coordination degree model. Furthermore, the Fractional Logit model was employed to identify factors influencing the system's coordinated development. The findings reveal that: (1) The development indices indicate a hierarchy of water system>water-cropland-grain-cotton system>cropland system>grain-cotton system. Post-2013, the development index of the cropland system in Aksu and Kashgar Prefetures surged, surpassing those of the combined water-cropland-grain-cotton system and the individual water system. Changes in other areas were minimal. (2) The coordination level of the basin's coupled system ranges from 0.475 to 0.680, indicating a transition from minimal to basic coordination. Kashgar exhibits the highest coordination, while Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture the lowest. This index, after an initial gradual increase, experienced a notable decline post-2017, particularly in the Aksu Prefecture. (3) The number of reservoirs, general public budget expenditure, and population size emerge as critical factors influencing the system's coordination. An increase of one unit in these variables corresponds to a rise in the coupling coordination degree by 1.0%, 21.0%, and 35.6%, respectively.

Key words: water-cropland-grain-cotton; development index; coupling relationship; influence factor analysis